地球大数据支撑联合国可持续发展目标：气候变化与应对

黄 磊[1,2] 贾根锁[3] 房世波[4] 上官冬辉[5] 胡永红[1,2] 张兆明[2] 彭代亮[1,2]

1 可持续发展大数据国际研究中心 北京 100094
2 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094
3 中国科学院大气物理研究所 北京 100029
4 中国气象科学研究院 北京 100081
5 中国科学院西北生态环境资源研究所 兰州 730000

摘要 气候变化正在成为未来几十年人类可持续发展面临的主要威胁。如何准确监测极端气候事件和灾害，为应对气候变化和灾害防控提供强有力的数据和科学支持，成为亟待回答的重大科学问题和决策命题。联合国可持续发展目标（SDGs）第 13 项——“气候行动：采取紧急行动应对气候变化及其影响”（SDG 13），就是要通过各国的实际行动，减缓气候变化威胁，增强人类适应能力。然而，目前 SDG 13 相关指标都缺少空间数据和信息的支撑。地球大数据具有高度协同性和集成性，有利于减小研究和评估结果的不确定性，同时也能满足气候变化和灾害风险研究对科学数据提出的迫切需求。文章围绕减缓气候相关灾害影响和降低温室气体排放两大主题，通过地球大数据平台，综合多源空间数据，研究获取灾害时空分布、碳收支变化趋势的方法；并依据该方法获取具有空间信息的数据集，以支撑 SDG 13 实现，为气候减灾和碳减排提供决策支持。

关键词 地球大数据，可持续发展目标，气候行动

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20210705004

针对气候变化的影响和应对、极端天气气候事件及其灾害影响，如何准确监测极端气候事件和灾害，实时监控和评估灾情发展，为应对气候变化和灾害防控提供强有力的数据和科学支持，成为亟待回答的重大科学问题和决策命题。为应对气候变化及其影响，联合国可持续发展目标（SDGs）中设立第 13 项——

资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA19090122）
修改稿收到日期：2021年7月29日

“气候行动：采取紧急行动应对气候变化及其影响”（SDG 13），主要任务是减缓气候变化对人类的影响，提高应对气候变化的能力[1]。SDG 13目前主要涉及5个具体目标、8个指标（表1）。其中，有2个属于Tier Ⅰ级，即“有方法有数据”；6个属于Tier Ⅱ级，即“有方法无数据”。依据地球大数据特色，本文聚焦地球大数据支撑SDG 13的2个具体目标SDG 13.1和SDG 13.2。SDG 13.1实施的基础是《2015—2030年仙台减少灾害风险框架》，其主要监管机构联合国防灾减灾署在2019年发布的报告中指出，气候变化已是人类灾害损失的主要驱动因素①。SDG 13.2实施的基础是《巴黎协定》，该协议希望通过减少温室气体排放而减缓气温上升幅度。2020年9月22日，国家主席习近平在第75届联合国大会一般性辩论上郑重宣布：“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。”努力实现碳达峰、碳中和战略，是中国应对气候变化、实现SDG 13最重要的举措。

地球大数据具有高度协同性和集成性，有利于减小研究结果的不确定性，同时也能满足气候变化和相关灾害风险研究对科学数据提出的迫切需求。研发具

表1　SDG 13具体目标和指标

Table 1　Targets and indicators of SDG 13

具体目标	指标	级别*
13.1 加强各国抵御和适应气候相关的灾害和自然灾害的能力	13.1.1 每10万人当中因灾害死亡、失踪和直接受影响的人数	Tier Ⅰ
	13.1.2 依照《2015—2030年仙台减少灾害风险框架》通过和执行国家减少灾害风险战略的国家数目	Tier Ⅱ
	13.1.3 依照国家减少灾害风险战略通过和执行地方减少灾害风险战略的地方政府比例	Tier Ⅱ
13.2 将应对气候变化的举措纳入国家政策、战略和规划	13.2.1 具有国家自主决定捐款、长期战略、国家适应计划、适应信息通报和国家信息通报战略的国家数量	Tier Ⅱ
	13.2.2 年温室气体总排放量	Tier Ⅰ
13.3 加强气候变化减缓、适应、减少影响和早期预警等方面的教育和宣传，加强人员和机构在此方面的能力	13.3.1 （ⅰ）全球公民教育和（ⅱ）可持续发展教育在（a）国家教育政策、（b）课程、（c）教师教育和（d）学生评估中主流化的程度	Tier Ⅱ
13.a 发达国家履行在《联合国气候变化框架公约》下的承诺，即到2020年每年从各种渠道共同筹资1 000亿美元，以满足发展中国家的需求，帮助其切实开展减缓行动，提高履约的透明度，并尽快向绿色气候基金注资，使其全面投入运行	13.a.1 到2025年，与持续现存集体筹集1 000亿美元承诺目标相关的每年提供和筹集的美元数额	Tier Ⅱ
13.b 促进在最不发达国家和小岛屿发展中国家建立增强能力的机制，帮助其进行与气候变化有关的有效规划和管理，包括重点关注妇女、青年、地方社区和边缘化社区	13.b.1 具有国家自主决定捐款、长期战略、国家适应计划、适应信息通报和国家信息通报战略的最不发达国家和小岛屿发展中国家的数量	Tier Ⅱ

* Tier分类用于表征各可持续发展指标监测评估方法和数据状态，分为Tier Ⅰ、Tier Ⅱ和Tier Ⅲ 3类；其中，Tier Ⅰ是指指标定义清晰、有明确的计算评估方法，也有有效的监测评估数据；Tier Ⅱ是指指标定义清晰、有明确的计算评估方法，但还缺乏监测评估数据；Tier Ⅲ是指指标还没有国际上确定的方法或标准

Tier classification is used to characterize the monitoring and evaluation methods and data status of various sustainable development indicators. It is divided into Tier I, Tier II, and Tier III. Among them, Tier I refers to the indicators with clear definition and evaluation methods, and effective monitoring data; Tier II refers to the indicators with clear definition and evaluation methods, but there is still a lack of monitoring data; Tier III refers to the indicator that has not been determined methods or standards

① Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (2019). https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-disaster-risk-reduction-2019.

有空间信息的指标数据，将成为下一步推进 SDGs 实现的重要突破点②。现有指标评估数据，往往都是统计数字，缺少详细的时空分析和数据支撑，以及对应对气候变化更多的指导和方案。SDG 13.1 和 SDG 13.2 涉及的监测评估方法和数据状态均属于 Tier Ⅱ，即“有方法无数据”。SDG 13.1 和 SDG 13.2 没有充分考虑到对地观测方法监测实施进展，急需对其内涵进行扩充；而拓展气候相关灾害、气候变化影响的空间分布信息，才能制定更明确的扩充内涵的措施。

气候变化是人类需要长期面对的共同问题。中国及世界其他地方已经或即将受到气候变化的哪些影响，如何在气候变化背景下降低灾害损失、减少影响并实现可持续发展，都是学术界和决策者关注的焦点问题[2]。本文重点围绕 SDG 13.1 和 SDG 13.2，通过地球大数据平台，为促进 SDGs 实现作出以下 3 方面贡献：气候变化参数的方法模型、空间信息明确的数据产品、气候变化应对决策支持。

1 落实 SDG 13 的现状与进展

1.1 SDG 13.1 现状与进展

2019 年全球二氧化碳排放达到 36.7 Gt，比 1990 年高出 62%；2016—2020 年的全球平均气温比工业化前期高出 1.1℃ ③。温室气体排放不断增加和累积，导致全球温度升高、降水分布不均衡加剧，从而造成高温热浪、干旱、洪涝、森林火灾、沙尘暴等一系列自然灾害的发生频次增多和极端性增强④。

气候变化导致的极端天气、人类活动导致的环境破坏将是未来 10 年全球面临的主要风险⑤。2000—2019 年，全球共记录了极端天气造成的 7 348 次大型灾害事件，导致 123 万人丧生，影响 42 亿人次，对全球造成 2.97 万亿美元经济损失⑥。

但是，现有的相关灾害指标研究中，往往都是统计数字，关于灾害种类、影响范围和频次、受灾人口分布等情况，都缺少空间数据支撑和多层次分析，因而也就难以对减灾形成更多的指导和预警。

1.2 SDG 13.2 状态与进展

减缓全球平均气温升高幅度，对于人类健康、粮食安全、陆地和海洋生态环境具有重要意义；而减少温室气体的排放，是实现《巴黎协定》控制升温目标的关键⑦。目前来看，人类距离《巴黎协定》温室气体排放要求还有很大差距[3]。2020 年暴发的新冠肺炎疫情全球大流行，曾短暂降低了温室气体排放量，但继续升高的长期趋势并没有变化⑧。

中国从 2005 年左右⑨开始，已经成为全球最大的温室气体排放国[4]。中国的碳达峰、碳中和战略，将使 21 世纪末全球平均气温相较于中国不采取行动降低 0.2℃—0.3℃。这增加了实现《巴黎协定》的可能性⑩，展现了中国负责任大国的形象。

② The Sustainable Development Goals Report, 2020. https://unstats.un.org/sdgs/report/2020.
③ United in Science 2020—A multi-organization high-level compilation of the latest climate science information. https://public.wmo.int/en/ resources/united_in_science.
④ Global Environment Outlook-GEO-6: Healthy Planet, Healthy People, 2019. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/27539; Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. IPCC, 2019. https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers.
⑤ The global risks report 2021, 16th Edition. https://www.weforum.org/reports/the-global-risks -report -2021.
⑥ Dramatic rise in climate disasters over last twenty years. https://philippines.un.org/en/95345-un-report-dramatic-rise-climate-disasters-over-last-20-years.
⑦ Special report: Global warming of 1.5 ℃. https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm.
⑧ Emissions gap report 2020. https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020.
⑨ 不同的数据来源对该时间的表述略有差别，综合来看为 2005 年左右。
⑩ The recent wave of net zero targets has put the Paris Agreement's 1.5℃ within striking distance. https://climateactiontracker.org/publications/global-update-paris-agreement-turning-point.

要实现碳中和，在减少碳排放的同时，还要增加自然生态碳汇的能力。对人为排放的温室气体，海洋、陆地尤其是森林都具有较强的碳汇能力[5,6]。有研究显示，2010—2016年，中国自然碳汇的比例大约是45%[7]。

碳中和已成为当前气候行动最紧迫的任务，但是目前SDG 13的指标设置较为粗略，仅仅包含了温室气体排放量，对于碳中和如何实施、进展如何等，则缺乏足够的指导。

2 地球大数据平台方法

地球大数据综合集成基于卫星遥感的对地观测数据、统计数据、地面站点数据、基础地理数据等，可以有效地监测大区域范围内极端气候和灾害；特别是使灾害灾情监测更及时、准确，包括台风、洪涝、干旱、地震等重大灾害的发生情况；针对“一带一路”沿线灾害风险挑战，建立极端气候与灾害数据集成分析平台，将对多年灾害的发生、发展和风险决策提供支持。而“星—机—地”一体化的监测将对不同时空尺度的极端气候和灾害事件进行连续、动态、大范围、实时监测[8]。应用于助力SDG 13实现的地球大数据如表2所示。

使用的数据集成在地球大数据云平台，通过开展云计算、人工智能等分析方法，进行产品的生产及指标计算。每一个全球性产品都会用到上万景或几十万

表2　应用于助力SDG 13实现的地球大数据

Table 2　Big Earth Data applied to SDG 13

数据类型	具体形式
对地观测数据	高分系列、美国陆地卫星（Landsat）系列、美国国家海洋和大气管理局（NOAA）卫星系列、中分辨率成像光谱仪（MODIS）卫星系列、美国轨道碳观测（OCO-2）卫星等10余颗卫星数据
统计数据	相关灾害统计年鉴等
地面站点数据	气温、降水、土壤水分等数据
基础地理数据	人口分布、土地变化等数据

景遥感数据，再加上基础站点数据等，对运算要求较高。由于使用云计算平台和智能化处理算法，计算和处理效率大幅提高。

围绕气候相关灾害、气候变化应对两个具体目标，聚焦“一带一路”沿线和全球两个空间尺度，下文以2010—2020年与高温热浪、林草火灾、温室气体、碳汇变化相关的4个案例为例（图1），介绍地球大数据在促进SDG 13实现中的应用成果。

3 应用案例

3.1 “一带一路”沿线地区高温热浪

全球温室气体浓度和平均气温的升高导致极端温度事件发生频率明显增加，高温热浪将侵袭更多的“一带一路”沿线国家和地区。准确的空间探测和气候规律分析，将会为“一带一路”沿线国家和地区提供及时的预警或灾害减缓等应急支持。使用Aqua/Terra卫星、美国国家海洋和大气管理局（NOAA）卫星逐日地温数据，以及11万个气温观测站数据，结合相对阈值法可进行热浪事件判定。

“一带一路”沿线陆地区域多年高温热浪分析表

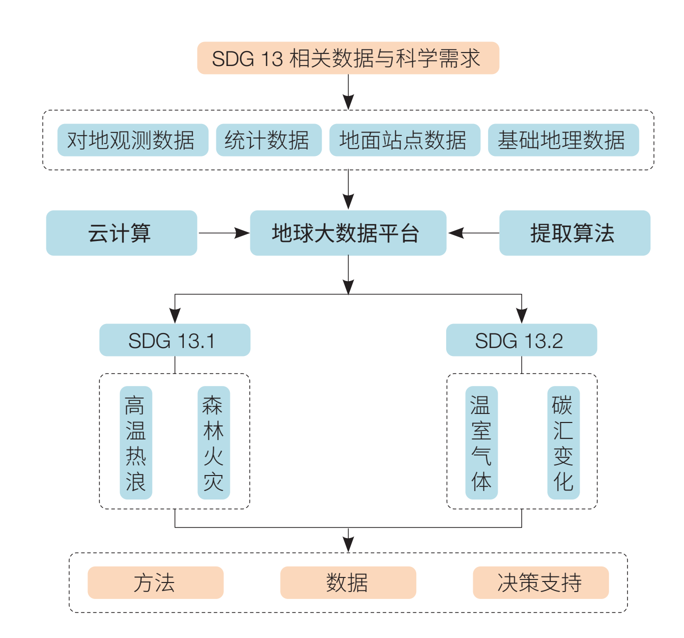


图1　基于地球大数据的SDG 13研究框架

Figure 1　Flow chart of research on SDG 13 using Big Earth Data

明，高温影响的重点区域通常分布在亚欧大陆的中南部，以及非洲和大洋洲大部分区域（图 2）。2010—2020 年热浪持续时间在欧洲中北部、亚洲北部和大洋洲中南部区域存在明显增加。这些地区也是近年来热浪耦合灾害影响的重点区域，主要体现在近极圈区异常升温和澳大利亚多年热浪导致的干旱与火灾频发。近 10 年极端高温的影响强度也在显著升高，如：亚洲和欧洲北部极端温度上升了约 2℃—5℃；澳大利亚部分区域的极端温度升高超过 10℃ 以上。

3.2 全球林草火灾

森林和草原火灾是一种常见的灾害形式，火灾的发生与气温、降水、可燃物等因素直接相关。火烧迹地能够反映火灾的空间分布特征。利用 80 多万景遥感数据和人工智能方法，研发 2015 年和 2019 年全球 30 m 分辨率火烧迹地产品（图 3）。2015 年和 2019 年全球火烧迹地总面积分别为 3.6745×10^6 km^2 和 3.6566×10^6 km^2，总面积基本稳定。非洲火烧迹地面积最大，2015 年和 2019 年面积分别为 2.7012×10^6 km^2 和 2.7407×10^6 km^2。

2015—2019 年澳大利亚火烧迹地的空间分布格局发生了显著变化。2019 年澳大利亚东部沿海和东南沿海的火烧迹地明显增多，这些地区是澳大利亚主要的森林分布区及城市和人口分布区，在历史上并非火灾多发区。全球变暖背景下，强正位相印度洋偶极子（pIOD）事件更加多发，而 2019 年秋季的强 pIOD 事件导致了澳大利亚东部的高温热浪和干旱。气候变化引起的极端高温和干旱是导致 2019 年该地区罕见森林火灾的重要原因。

3.3 全球温室气体排放

减少温室气体排放量是减缓气候变化，控制全球升温幅度，实现《巴黎协定》的关键。二氧化碳是大气中占比最高的温室气体。我们使用美国国家航空航

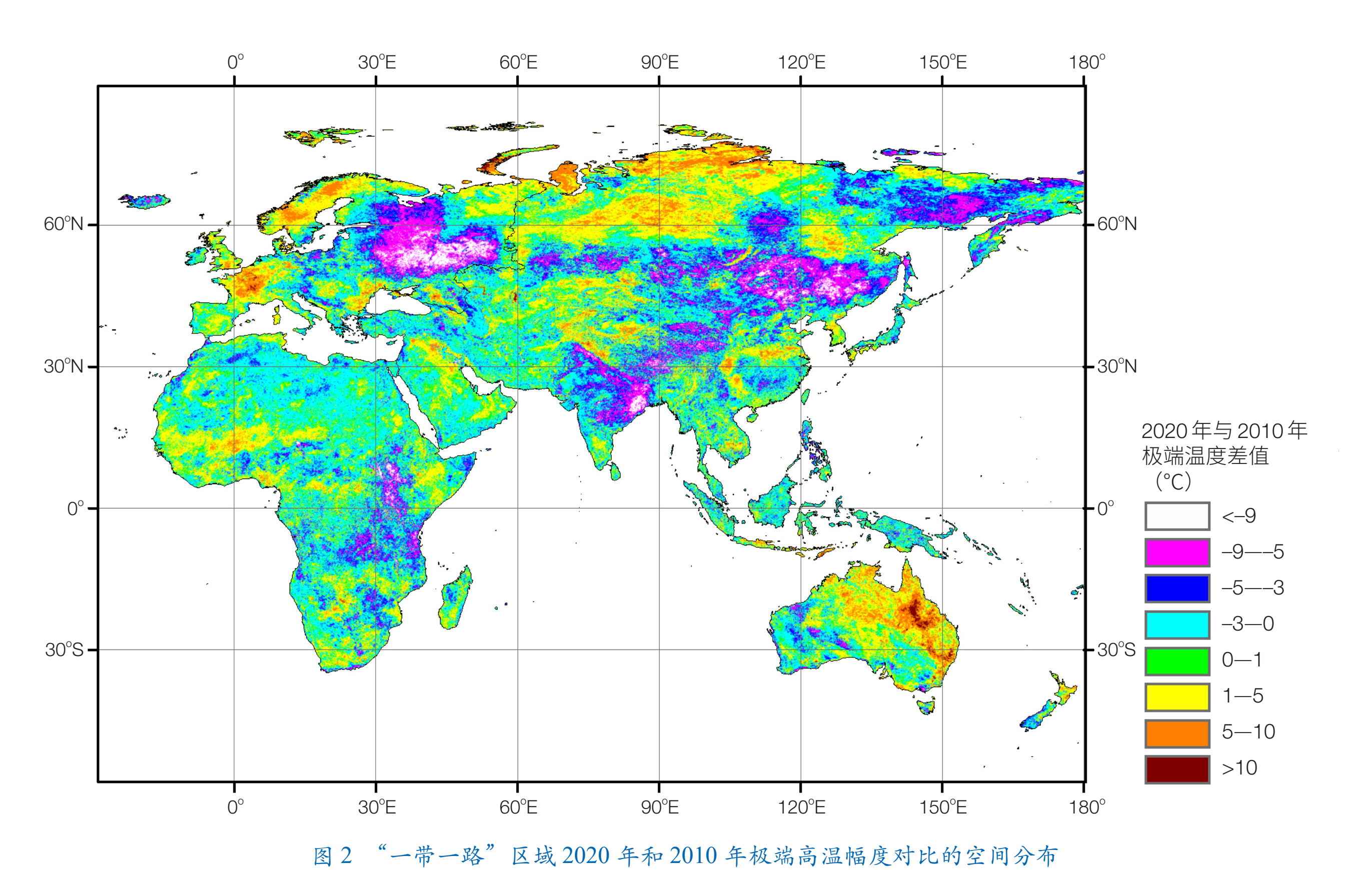


图 2 “一带一路”区域 2020 年和 2010 年极端高温幅度对比的空间分布
Figure 2 Spatial distribution of extreme high temperature difference between 2020 and 2010 along the Belt and Road region

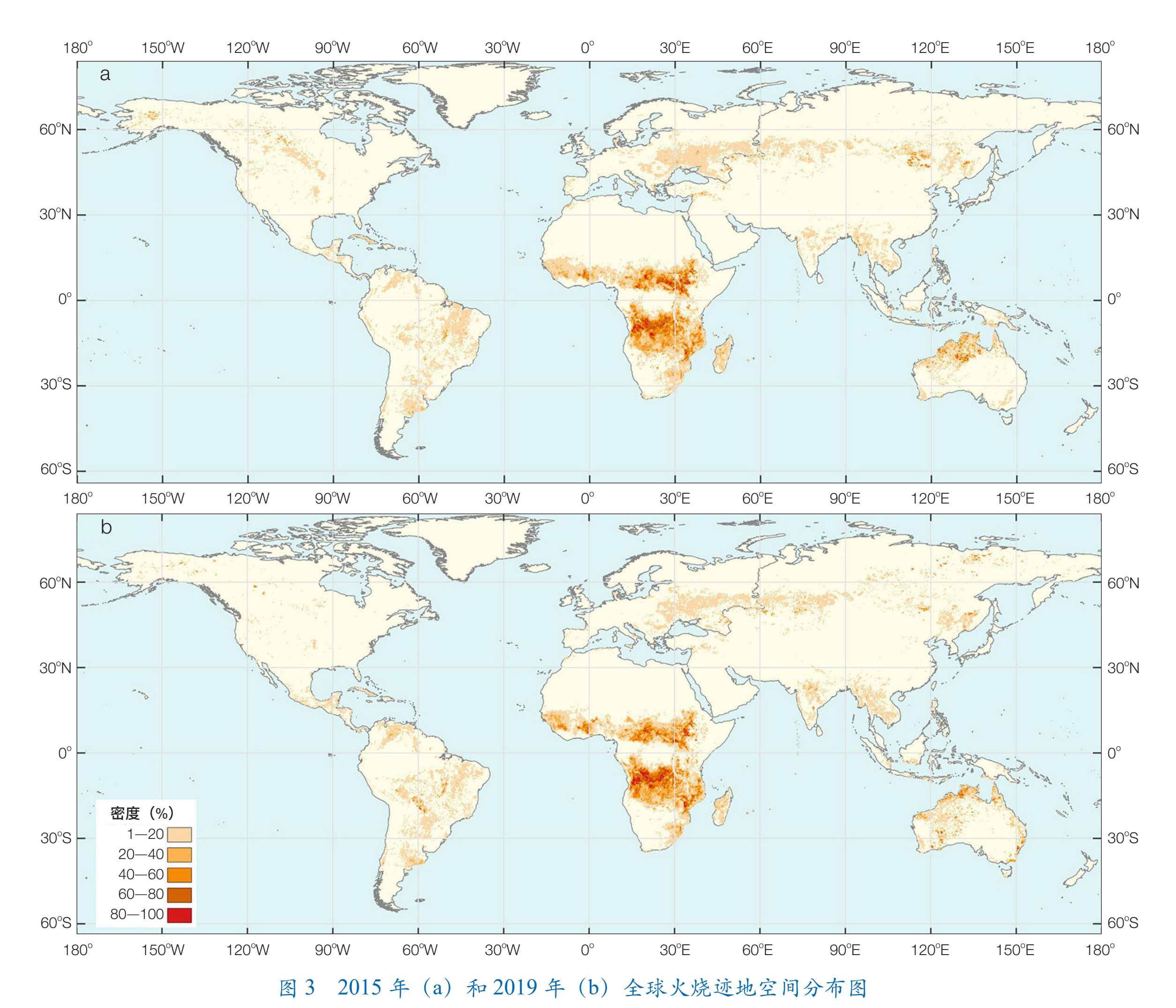


图 3　2015 年（a）和 2019 年（b）全球火烧迹地空间分布图

Figure 3　Global spatial distribution of burned area in 2015 (a) and 2019 (b)

天局（NASA）轨道碳观测卫星（OCO-2）数据及 3 万多景的欧洲航天局（ESA）“哨兵 5 号”卫星大气多光谱数据，获取了全球二氧化碳和二氧化氮浓度。作为化石能源燃烧的伴生气体，二氧化氮生存期更短，数据分辨率更高（0.01°），其浓度与各地碳排放量具有极高的相关性。卫星监测的温室气体浓度同时受到经济发展速度、季节性气温变化、化石能源使用比例等因素共同影响，随时间产生波动。

根据卫星数据（图 4），全球二氧化碳浓度在 2015—2018 年仍然在增加；我国二氧化碳浓度具有明显的时空差异性，东南部地区浓度较高，西部地区浓度较低。二氧化氮数据分析显示，受新冠肺炎疫情影响，我国二氧化氮在 2020 年 3 月达到近年来排放的低谷；受到经济恢复和强寒潮导致供暖需求增加的共同影响，2020 年 12 月浓度重新回到峰值，超过了 2019 年同期水平。

3.4 全球陆地生态碳汇变化评估

基于北方生态系统生产力模拟（BEPS）模型，利用逐日最高气温、最低气温、平均相对湿度、日降水量、日总辐射、叶面积指数、二氧化碳变化与氮沉降变化数据，采用随机森林算法，计算土地覆盖变化、气候变化、二氧化碳变化与氮沉降变化对全球总碳汇变化的贡献。

分析 2001—2019 年中分辨率成像光谱仪（MODIS）的植被净初级生产力（NPP）年际变化发现，总体而言，全球尺度碳汇 2001—2019 年呈现增加趋势。

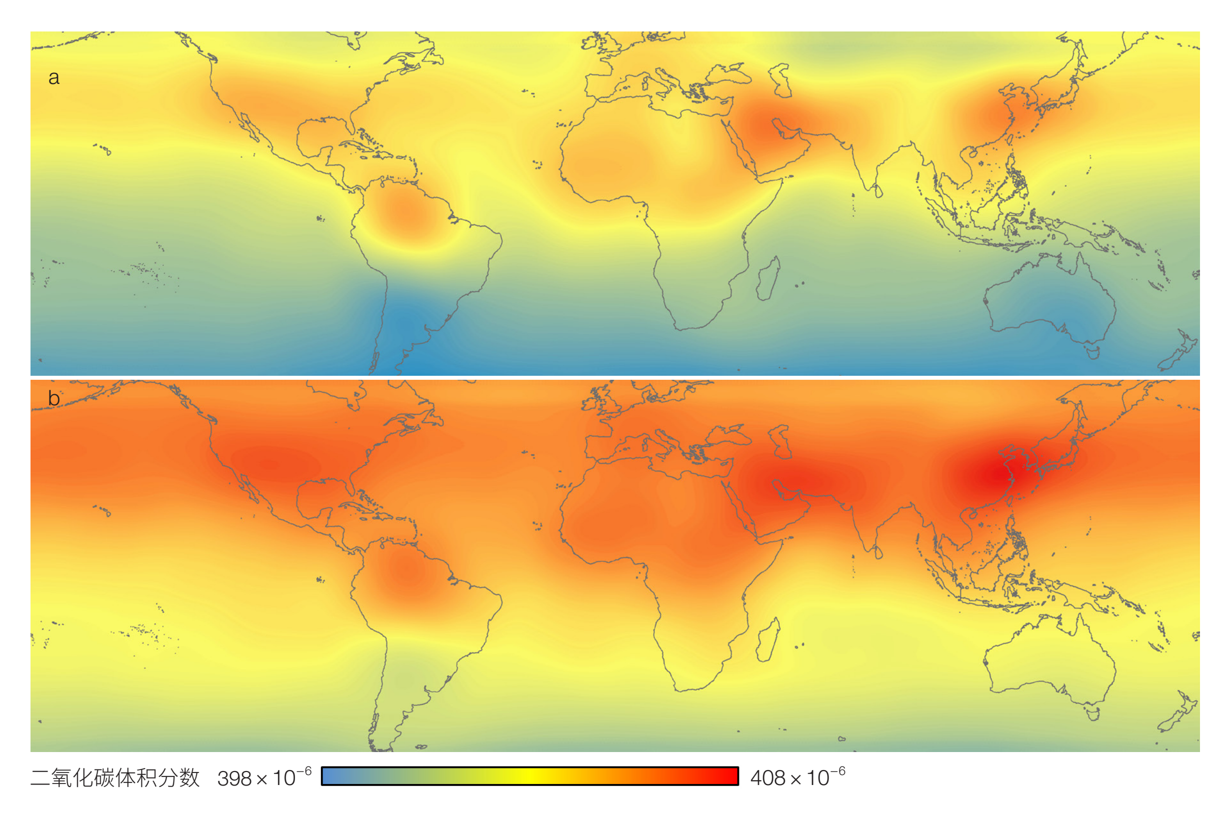


图 4　2015 年（a）和 2018 年（b）全球二氧化碳浓度
Figure 4　Global carbon dioxide concentration in 2015 (a) and 2018 (b)

从 2001 年的 1.57 Pg，增加到 2019 年的 2.84 Pg，年际线性增加幅度是 0.08 Pg；尤其是，中国的南部及中部区域、俄罗斯的西北部及东北部、印度、中非、北美北部、南美西部等区域；而降低比较明显的区域有澳大利亚的中西部区域、中亚、非洲南部、美国与巴西的东部区域等。中国区域碳汇增加显著，从 2001 年的 63.95 Tg，增加到 2019 年的 223.81 Tg，年际线性增加幅度是 8.72 Tg。

主要驱动因素对陆地生态系统碳汇贡献如图 5 所示：土地覆盖变化对碳汇影响主要在欧洲与北美的中高纬度区域、中国的中部及南部区域；气候变化对碳汇起主要作用区域在中亚、澳大利亚、非洲南部、美国的中西部；二氧化碳变化和氮沉降变化主要作用集中在中高纬度区域。从全球来说，土地覆盖变化对 2001—2019 年陆地生态系统碳汇变化的重要性达 43%，气候变化对碳汇变化的重要性约 33%，二氧化碳变化与氮沉降变化对碳汇变化的重要性约 24%。

4 总结与展望

本文阐述了 SDG 13 当前实施的进展和对数据的需求，通过 4 个案例阐述了地球大数据对气候行动的贡献。重点围绕 SDG 13.1，展现了高温热浪、林草火灾的时空分布，以及部分地区林草火灾的增加与高温干旱的密切关系。围绕 SDG 13.2，分析了全球温室气体的变化趋势及碳汇变化的驱动因素，发现全球二氧化碳浓度依然在升高；中国二氧化碳浓度增加有放缓趋势，但 2020 年波动较大；气候变化和土地利用变化对全球的碳汇具有重要影响。只有清楚了气候变化引起灾害的强度、频率、空间分布，才能够更好地积极应对这些灾害，减少损失；只有清楚碳的来源、去向和变化趋势，才能为碳达峰、碳中和战略提供更好的支撑，防止人类面临气候变化失控的风险。

地球大数据方法为 SDG 13 提供了一系列刻画全球气候变化影响和应对的多时相空间数据集，包括“一

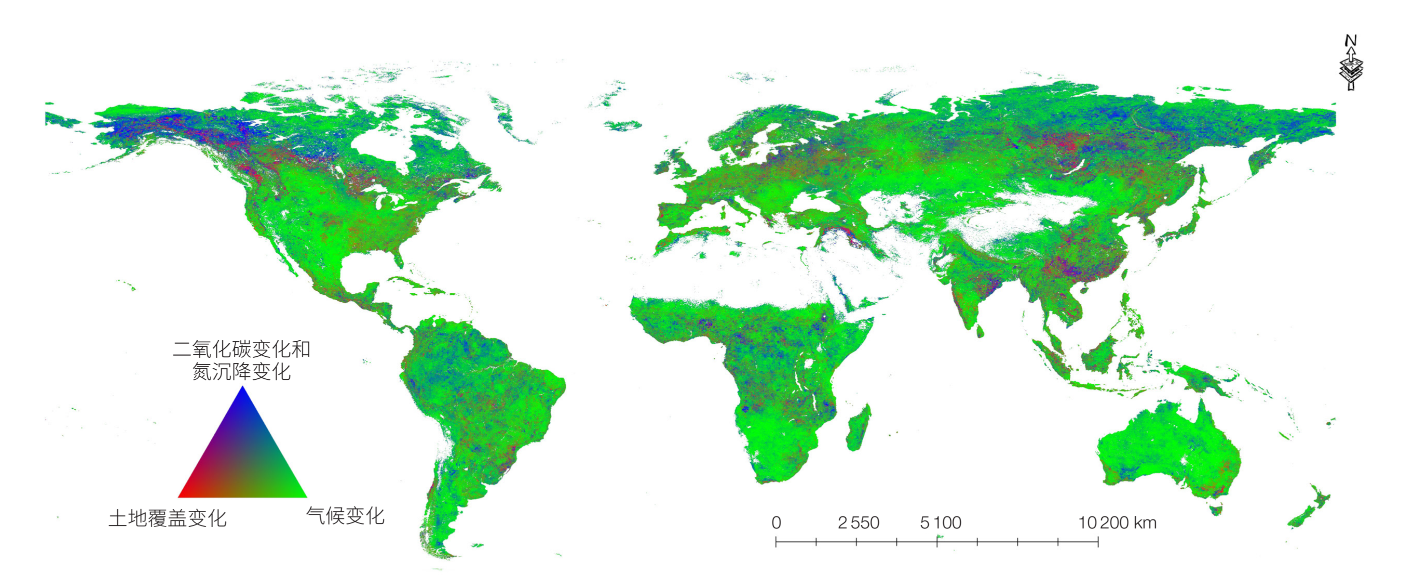


图 5　2001—2019 年土地覆盖变化、气候变化、二氧化碳变化和氮沉降变化对陆地生态系统碳汇（NEP）变化的贡献
Figure 5　Contribution of land cover change, climate change, carbon dioxide change, and nitrogen deposition change to terrestrial ecosystem carbon sink (NEP) change

带一路”沿线高温热浪、全球林草火灾、全球大气二氧化碳浓度、生态系统全球碳汇变化 4 套多时相数据集。另外，中国科学院地球大数据平台已集成了全球和区域洪涝、干旱、冰川变化、海洋热量等多套气候变化相关指标数据集，将为加深气候变化影响和应对的科学认知、全人类共同应对气候变化带来的挑战和增强韧性，提供有力的数据支撑[9,10]。

无论是面对气候变化带来的影响，还是为了应对气候变化做出的行动，都在逐渐改变人类的生活方式，并可能带来一场科技革命。气候变化影响的方面多、范围广、时间长，需要地球大数据发挥自身优势，回溯过去的踪迹，监测当前的状态，并为人类可持续发展道路指明未来的方向。

参考文献

1 Nerini F, Sovacool B, Hughes N, et al. Connecting climate action with other Sustainable Goals. Nature Sustainability, 2019, 2: 674-680.

2 Cheng H. Future Earth and sustainable developments. The Innovation, 2020, 1(3): 100055.

3 Crippa M, Guizzardi D, Muntean M, et al. Fossil CO_2 Emissions of All World Countries—2020 Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.

4 Olivier J G J, Peters J A H W. Trends in Global CO_2 and Total Greenhouse Gas Emissions: 2020 Report. Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2020.

5 Pugh T, Lindeskog M, Smith B. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. PNAS, 2019, 116: 4382-4387.

6 McKinley G, Pilcher D, Fay A, et al. Timescales for detection of trends in the ocean carbon sink. Nature, 2016, 530: 469-472.

7 Wang J, Feng L, Palmer P, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. Nature, 2020, 586: 720-723.

8 Guo H, Nativi S, Liang D. Big Earth Data science: An information framework for a sustainable planet. International Journal of Digital Earth, 2020, 13: 743-767.

9 郭华东. 地球大数据支撑可持续发展目标——中国篇. 北京: 科学出版社, 2020: 178-193.

10 郭华东. 地球大数据支撑可持续发展目标——“一带一路”篇. 北京: 科学出版社, 2020: 154-201.

Big Earth Data for UN Sustainable Development Goals: Climate Change and Action

HUANG Lei[1,2] JIA Gensuo[3] FANG Shibo[4] SHANGGUAN Donghui[5]

HU Yonghong[1,2] ZHANG Zhaoming[2] PENG Dailiang[1,2]

(1 International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China;

2 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

5 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Climate change is becoming a major threat to human sustainable development in the coming decades. How to accurately and real-time monitor extreme weather events and disasters, and provide strong data and scientific support for climate change and disaster prevention and control, has become an urgent major scientific issue and decision-making proposition. The Sustainable Development Goals (SDGs) 13 Climate Action is to alleviate the threat of climate change and enhance human adaptation through the actions of countries. However, indicators of climate action lack the support of spatial data and information. The Big Earth Data is highly collaborative and integrated, which is conducive to reducing the uncertainty of research and assessment results. At the same time, it also reflects the urgent demand of climate change and disaster risk research for scientific data. This study focuses on the two major themes of mitigation of the impact of climate change related disasters and the reduction of greenhouse gas emissions. Through the Big Earth Data platform, the work studies the methods of obtaining the spatial distribution of disasters and the trend of carbon budget change through the comprehensive multi-source data, and obtains the data sets with spatial information to support the SDG 13 Climate Action, providing decision support for disaster reduction and emission reduction.

Keywords Big Earth Data, Sustainable Development Goals (SDGs), climate action



黄 磊 中国科学院空天信息创新研究院副研究员。中国科学院青年创新促进会会员。主要从事地球大数据支撑气候行动可持续发展目标的研究工作，包括冰冻圈的变化遥感、温室气体浓度遥感等。以第一或通讯作者在*Remote Sensing of Environment*、*Journal of Geophysical Research*等期刊发表SCI论文15篇。E-mail: huanglei@radi.ac.cn

HUANG Lei Associate Professor in Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Ph.D., Member of Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences. He is responsible for the research work of supporting SDG 13 with Big Earth Data. His research interest includes remote sensing of Glacier change and Green House Gas. As the first or corresponding author, he has published 15 papers in *Remote Sensing of Environment*, *Journal of Geophysical Research*, and other journals. E-mail: huanglei@radi.ac.cn

■责任编辑：文彦杰